

УДК 629.017

Толубко В.Б., Васильев Б.Г., Березан А.М.

## **РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ МАНЕВРЕННОСТИ УВЕЛИЧЕНИЕМ СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ МАШИН С НЕГОЛОНОМНЫМИ СВЯЗЯМИ КОЛЕСНОГО ТИПА**

### **Введение**

Интенсивное развитие наземных транспортных средств приводит к постоянному росту их числа и к увеличению многообразия конструктивно - компоновочных схем, к увеличению длины и количества кинематических звеньев автопоездов. Не смотря на различное предназначение машин всех их объединяет требование обеспечения беспрепятственного безаварийного движения. Если в вертикальной плоскости это требование удовлетворяется профильной проходимостью и опорно-сцепными характеристиками машины, то в горизонтальной плоскости - маневренностью.

Можно рассматривать различные аспекты маневренности [1] : управляемость (легкость управления, степень поворачиваемости - нейтральную, излишнюю и недостаточную поворачиваемость), поворотливость (статическую, динамическую), вписываемость (внешнюю, внутреннюю). Но наиболее актуальными, и в то же время в наименьшей степени изученными и решенными, оказались вопросы внешней вписываемости.

Не смотря на совершенствование дорожной сети все чаще и чаще встречаются непредвиденные дорожные ситуации, когда необходимо маневрировать в стесненных условиях дорожных препятствий , которые возникают как для колес так и для габаритных точек машины. Эти задачи еще больше обостряются для средств подвижности вооружения и военной техники, что связано с современными требованиями повышения мобильности, подвижности и маневренности войск, вооружения и военной техники.

**Постановка проблемы.** Требуется найти решение проблемы существенного повышения маневренности машин по параметрам внешней вписываемости в дорожные препятствия в условиях действия неголономных связей колесного типа, исключающих боковое движение.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Действие неголономных связей направления движения, которые накладываются на машину со стороны колес, конкретизируют задачу управления маневрированием - изменение направления движения машин осуществляется неголономными связями путем поворота колес без бокового скольжения.

Поворот неголономной системы колес осуществляется с помощью рулевой трапеции Жанто, которая была изобретена в 1878 году. С тех пор рулевая трапеция в различном конструктивном исполнении (в том числе и электронная) является неотъемлемой частью всех без исключения машин с поворотными колесами. Ее недостатком для маневренности является ограничение степени подвижности всего двумя обобщенными координатами - дуговой координатой (путь криволинейного движения) и относительным углом поворота рулевого колеса, которому соответствует угол поворота неголономной системы. В то же время из теоретической механики известно, что машина на плоскости как твердое тело имеет три степени свободы. Значит потенциально в машине имеется в запасе еще одна степень свободы, которая до сих пор еще не реализована для повышения маневренности. А для многозвенных автопоездов этот резерв составляет еще большее число.

Последние исследования в области движения неголономных систем [2-10] подтверждают гипотезу о том, что повышение степени подвижности при маневрировании

возможно и решение необходимо искать в той области, которая исключает принципы, заложенные в рулевой трапеции Жанто.

**Цель данной статьи** – проанализировать принципы поворота, заложенные в рулевой трапеции Жанто, и обосновать такие решения задач маневренности машины, которые позволяли бы увеличивать степень подвижности в условиях действия неголономных связей колёсного типа.

**Изложение основного материала**

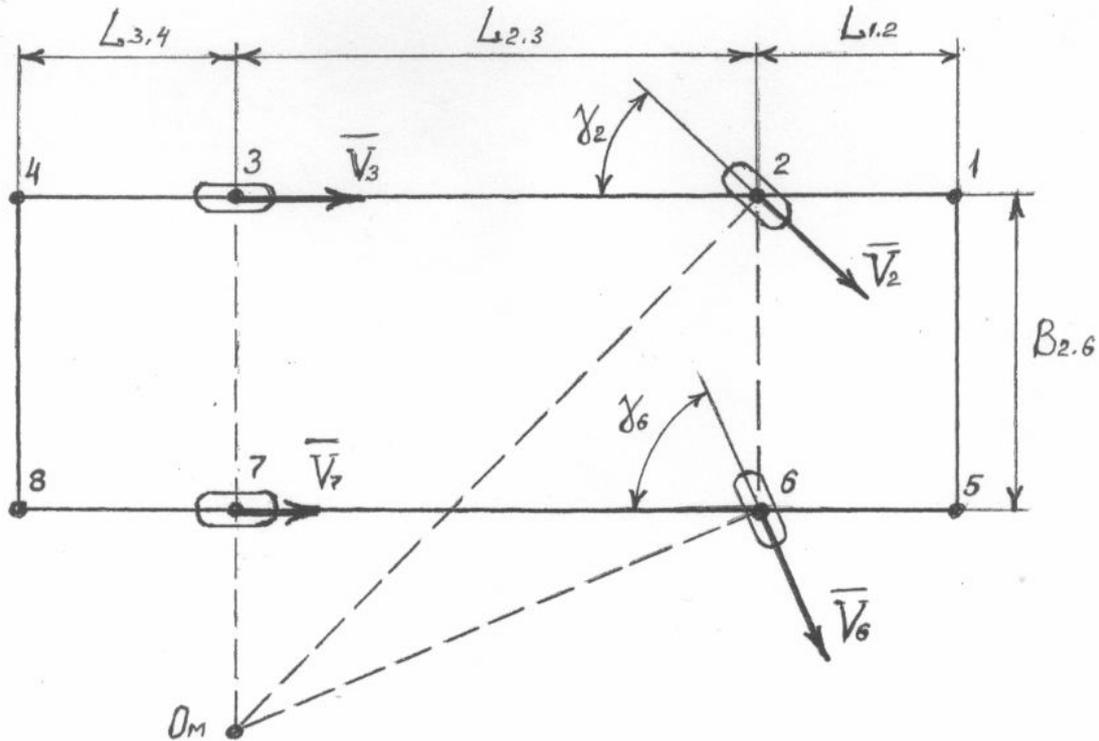


Рисунок 1 - Принцип построения рулевой трапеции Жанто с задними неповоротными колесами машины

Рассмотрим двухосную машину (рис. 1) с передними поворотными колесами в точках 2 и 6 и с задними неповоротными колесами в точках 3 и 7. Движение машины однозначно задается неголономными связями (НГС) в точках 2,3,6 и 7, которые задают направления векторов скоростей в этих точках. Каждая НГС описывается дифференциальным уравнением первого порядка, которое для общего случая движения не может быть проинтегрировано. Число степеней свободы уменьшается на число независимых уравнений НГС [11]. Разработанные в этой области методики [5-8] позволяют определить число избыточных НГС и число независимых уравнений НГС. Для рассматриваемой системы число степеней свободы равно двум и может быть реализована с помощью двух органов управления: поступательного движения (педаль «газ - тормоз») для задания пути  $S_2$  (криволинейной координаты вдоль траектории точки 2) и поворота рулевого колеса для задания угла  $\gamma_2$  поворота колеса 2. Все остальные параметры движения могут быть вычислены.

Рулевая трапеция Жанто при любом конструктивном исполнении строится на таком принципе, чтобы обеспечить разные углы поворота  $\gamma_2$  и  $\gamma_6$  левого 2 и правого 6 колес, чтобы их радиусы поворота пересекались в одной точке  $O_m$ , расположенной на линии неповоротных колес 3 и 7 (Рис. 1). Математически этот принцип отображает формула Аккермана [12, с. 187]:

$$\text{Ctg}\gamma_2 - \text{Ctg}\gamma_6 = \frac{B_{2.6}}{L_{2.3}} \quad (1)$$

где  $\gamma_2, \gamma_6$  – относительные углы поворота внешнего и внутреннего колес;

$B_{2.6}$  - расстояние между шкворнями поворота колес;

$L_{2.3}$  – расстояние поворотных колес от неповоротных.

В этом случае подвижная центроида, которая строится из системы точек мгновенных центров скоростей  $O_M$  при изменении углов  $\gamma_2$  и  $\gamma_6$  [13], представляет собой прямую линию, которая проходит через точки 3 и 7. Эта подвижная центроида связана с машиной и движется вместе с ней. Во всех точках машины, которые совпадают с точками подвижной центроида, вектор скорости направлен вдоль машины и не изменяет эту направленность при любом повороте управляемых колес.

Неуправляемость поворотом вектора скорости этих точек как раз и представляет собой причину плохой маневренности. Точка 7 при движении прочерчивает крайнюю внутреннюю траекторию, которая требует для проезда машины большую ширину пути на повороте. Машина имеет только одну степень свободы для маневрирования - водитель поворотом рулевого колеса поворачивает сразу векторы скорости всех точек машины (кроме точек, совпадающих с подвижной центроидой).

В случае выполнения поворотными всех колес машины (рис. 2) вопросы маневренности принципиально не изменяются.

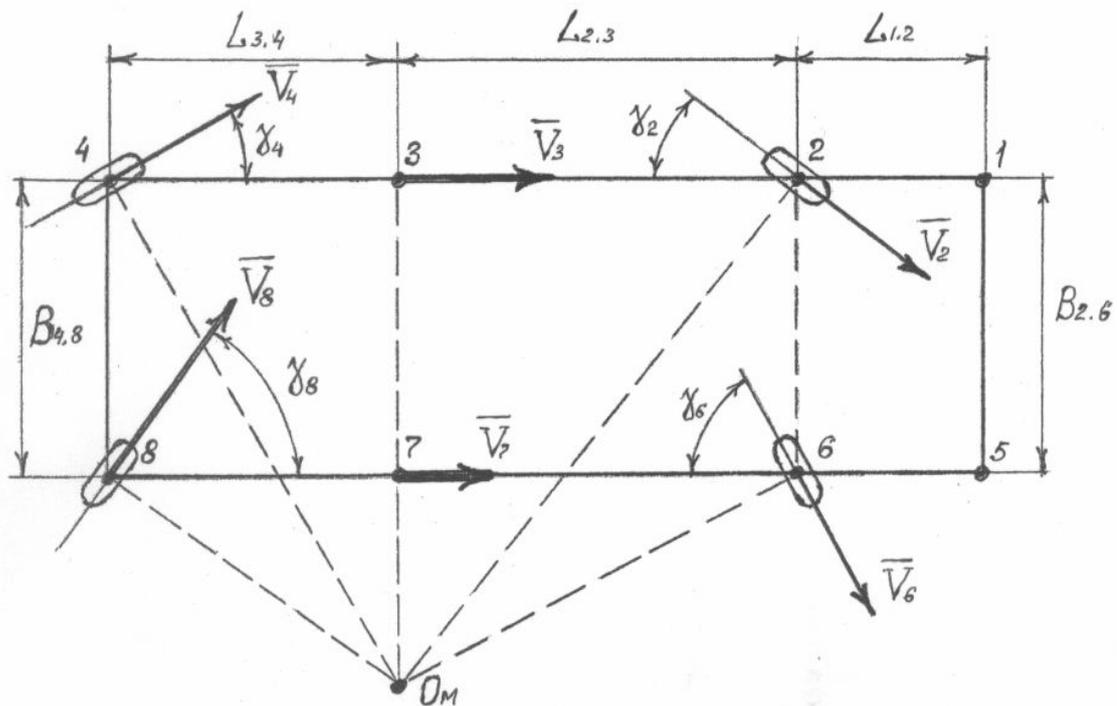


Рисунок 2 - Принцип построения рулевой трапеции Жанто со всеми поворотными колесами машины

Задние колеса с помощью своей рулевой трапеции поворачиваются в противоположную сторону на относительные углы  $\gamma_4$  и  $\gamma_8$ , которые также связаны формулой Аккермана:

$$\text{Ctg}\gamma_4 - \text{Ctg}\gamma_8 = \frac{B_{4.8}}{L_{3.4}} \quad (2)$$

где  $B_{4.8}$  - расстояние между шкворнями поворота задних колес;

$L_{3.4}$  - расстояние задних поворотных колес от подвижной центроиды.

Углы поворота задних и передних колес связаны уравнением:

$$\frac{\text{tg}\gamma_4}{\text{tg}\gamma_2} = \frac{\text{tg}\gamma_8}{\text{tg}\gamma_6} = \frac{L_{3.4}}{L_{2.3}} \quad (3)$$

Как и в предыдущем случае подвижная центроида представляет собой прямую линию, которая проходит через точки 3 и 7. Вектор скорости в этих точках как и раньше направлен вдоль машины и не изменяет эту направленность при маневрировании. Поэтому проблемы маневренности такой машины остаются такими, как они были у машины с неповоротными колесами в точках 3 и 7. Можно расположить в этих точках неповоротные колеса и они никак не будут влиять на траектории движения всех точек машины.

Таким образом, машина со всеми поворотными колесами любого количества, которые поворачиваются с помощью рулевой трапеции (механической или электронной), всегда имеет точки, движение которых полностью совпадает с траекториями движения неповоротных колес в этих точках, и маневренность такой машины не отличается от маневренности этой машины с неповоротными колесами. Этой мерой можно лишь уменьшить радиус поворота машины при ограничении максимального угла поворота колес. Но здесь появляется дополнительная проблема маневренности – возрастает задний свес  $L_{3.4}$ , что приводит к появлению на входе в поворот и на выходе из него новых внешних и внутренних траекторий движения, которые образуются точками 4 и 8. Эти траектории очень сложные и водитель не может одновременно управлять траекториями движения и передних колес, и задних колес, и точек заднего свеса.

Итак, при выполнении поворотными всех колес машины рулевая трапеция (ее принцип построения) не позволяет повысить маневренность больше, чем имеет машина с неповоротными колесами, и ограничивает число степеней свободы машины единицей.

Для многозвенного автопоезда (рис. 3) задача маневренности значительно усложняется, а маневренные возможности по вписываемости резко снижаются.

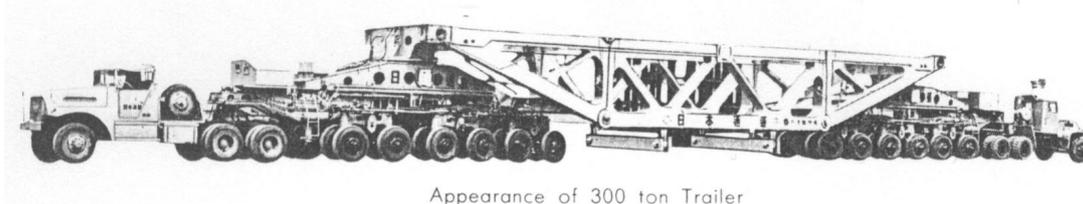


Рисунок 3 - Многозвенный многоосный автопоезд (Япония)

Этапы математического моделирования неголономной системы представлены на рис. 4.

Структурно – линейная неминимальная схема (рис. 4, а) включает в себя 9 кинематических звеньев (1,4,6,9 – независимые звенья; 2 и 8 – полузависимые; 3,5 и 7 – сцепки) и точки 10 ÷ 43, которые характеризуют конфигурацию неголономных связей и шарниров соединения звеньев.

Структурно – линейная минимальная схема (рис. 4, б) отображает только те связи, которые задают движение звеньев автопоезда, т.е. из рассмотрения исключены избыточные связи.

На рис. 4, в и рис. 5 отображено формализованное описание структуры неголономной системы приведенного автопоезда.

На схеме, изображенной на рис. 4, б, выделены во всех независимых и полунезависимых звеньях инерционные точки  $\tau$  - точки пересечения подвижных центроидов с продольной осью каждого звена. В них вектор скорости всегда направлен, как и у одиночной машины, вдоль продольной оси звена при любом повороте колёс. Поворот этого вектора происходит вместе с рамой звена. Поэтому наблюдается инерционность поворота – не сразу с поворотом рулевого колеса, а после прохождения определённого пути вдоль траектории движения. Это отображает и производная первого порядка в дифференциальном уравнении, связывающем эти параметры движения. А для координат траектории движения такой точки инерционность ещё возрастает на порядок – уравнение имеет производную второго порядка.

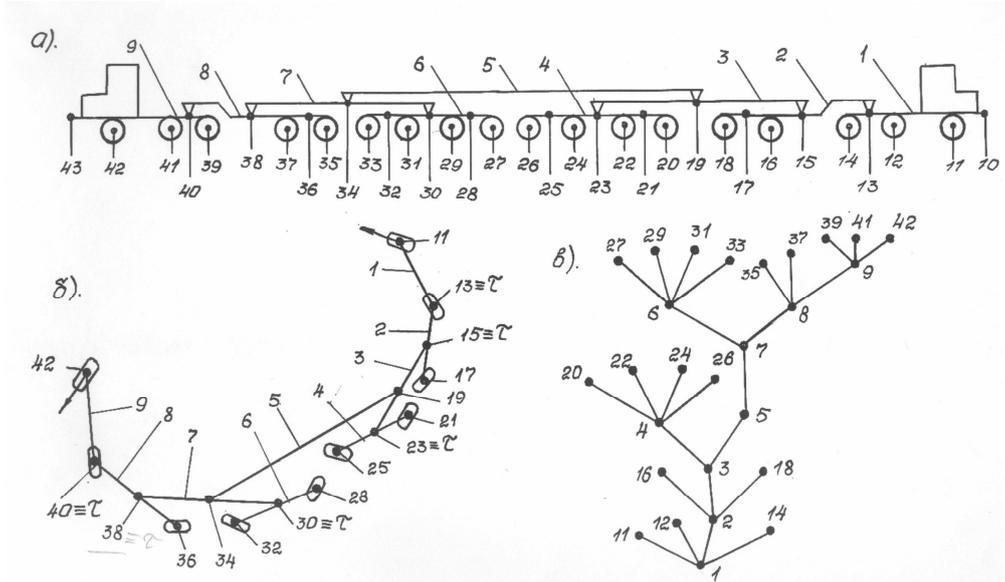


Рисунок 4 - Моделирование структурной схемы автопоезда: а) – структурно-линейная неминимальная схема; б) – структурно-линейная минимальная схема; в) – модель автопоезда в виде структуры дерева

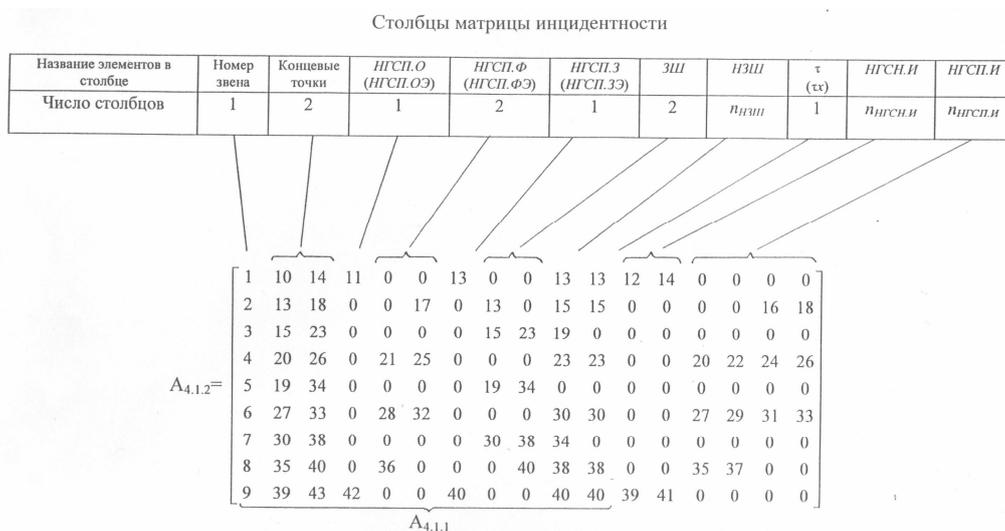


Рисунок 5 - Матрица инцидентности автопоезда

Полузависимые звенья автопоезда (подкатные тележки в виде полуприцепов) передними концами опираются на точки, которые являются инерционными у предыдущего смежного звена (например 13 и 15). Поэтому при таком последовательном соединении инерционность параметров маневрирования с каждым разом увеличивается на порядок. Управлять такой системой для изменения траекторий крайне затруднительно. Если же отказаться от принципа построения рулевой трапеции, то инерционные точки исчезнут, а число степеней свободы увеличится.

Приведенный автопоезд имеет такую же степень подвижности для маневрирования, как и одиночная машина – две степени свободы. Водитель задаёт дуговую координату на тягаче (скорость) и угол поворота рулевого колеса, а положение всех остальных звеньев определяет неголономная система.

Если отказаться от принципа построения рулевой трапеции, то на каждом звене автопоезда (на независимом и полузависимом) подвижность можно увеличить на одну степень свободы. Тогда для всего автопоезда увеличение подвижности составит шесть степеней свободы, которые можно реализовать в автоматической системе управления маневрированием.

Для этой автоматической системы возможно разработать набор моделей маневрирования, заложить их в бортовой компьютер, а водителю только выбирать нужную модель в зависимости от изменения условий движения на дороге относительно препятствий для маневрирования. Основу этих моделей составляют законы движения и управления маневрированием. Для машины такими законами, например, могут быть: движение двух правых колес по единой траектории, движение двух левых колес по единой траектории, движение двух правых габаритных точек по единой траектории, движение двух левых габаритных точек по единой траектории, движение любых выбранных двух точек машины в заданном направлении и заданной траектории (прямолинейной, круговой и прочие). Аналогично задача решается и для любого автопоезда.

### **Выводы**

Принцип построения рулевой трапеции Жанто, изобретённой в 1878 году, используется до сих пор во всех машинах с поворотными колёсами. Однако этот принцип не позволяет повысить маневренность выше, чем у машины с неповоротными задними колёсами.

Значительное увеличение маневренности возможно только при увеличении степени подвижности при маневрировании. Необходимым условием для этого является отказ от принципа поворота колёс, заложенного в рулевой трапеции Жанто. В этом случае можно увеличить подвижность машины на одну степень свободы, а подвижность автопоезда на число независимых и полузависимых звеньев автопоезда.

Повышение степени подвижности можно реализовать, с целью значительного повышения маневренности, в автоматической системе управления маневрированием для задания различных законов движения колёс и звеньев автопоезда и для задания различных законов управления маневрированием в зависимости от меняющейся дорожной обстановки в отношении дорожных препятствий для движения колёс и габаритных точек.

Полученные результаты относятся и к случаям, когда неголономные связи направленного движения накладываются на машину не только колёсными движителями, а и гусеничными, и шагающими.

Литература: Подригало М.А. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / под ред. М.А. Подригало / М.А. Подригало, В.П. Волков, В.И. Кирчатый, М.А.

Бобошко. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 403 с. 2. Васильев Б.Г. Синтез законов управления для совмещения траекторий движения точек неголономной системы тел / Б.Г. Васильев // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1994. – Вып. 2. – С. 69-77. 3. Васильев Б.Г. Virішення проблемних задач підвищення рухомості і маневреності великогабаритних багатоланкових спецагрегатів / Б.Г. Васильев, С.П. Биков, М.М. Радчин // Ракетно-космічна техніка. Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 1999. – Вип. 1. – С. 145-151. 4. Сахно В.П. Курсова стійкість двохланкового автопоїзда при русі заднім ходом / В.П. Сахно, Б.Г. Васильев, С.В. Гейко // Автошляховик України: Окремий випуск: Вісник Центрального Наукового Центру Транспортної Академії України, 2000. – № 3. – С. 94-97. 5. Васильев Б.Г. Допустимая область решения задачи о движении точек автопоезда по едбиным траекториям // Механіка та машинобудування.- Х.: НТУ «ХПІ», 2001.- №1,2.- С.319-323. 6. Васильев Б.Г. Основы теории маневренности систем с неголономными управляемыми колесными связями / Б.Г. Васильев, С.А. Марцинкевич // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, 2001. – Вып. 7-8. – С. 126-128. 7. Васильев Б.Г. Решение проблемы управления транспортной машиной для совмещения траекторий колес и габаритных точек / Б.Г. Васильев, С.А. Марцинкевич // Вестник ХГАДТУ: сборн. научн. тр. – Х: ХНАДУ, 2001. – Вып. 15-16. – С. 171-173. 8. Васильев Б.Г. Принципы построения квазиадаптивных систем маневрирования крупногабаритных спецагрегатов ракетного вооружения / Б.Г. Васильев // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2002. –Вип.5 (43) . – С. 337-349. 9. Васильев Б.Г. Перспективные направления глобального развития на качественно новый уровень средств подвижности вооружения и военной техники / Б.Г. Васильев, С.Р. Дурович // П'ята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 15 – 16 квітня 2009р.: тези доповідей. – Х.: ХУПС, 2009. – С. 125. 10. Васильев Б.Г. Проблема применимости принципа построения рулевой трапеции для существенного повышения маневренности полуприцепа / Б.Г. Васильев, Ю.В. Баистов // П'ята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 15 – 16 квітня 2009 р.: тези доповідей. – Х.: ХУПС, 2009. – С. 126. 11. Добронравов В.В. Основы механики неголономных систем: Учеб. пособие для вузов.- М.: Высшая школа, 1970.- 270с. 12. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – М.: Машиностроение, 1982. – 262с. 13. Павловський М.А. Теоретична механіка: підручник / М.А. Павловський. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.:іл.

Голубко В.Б., Васильев Б.Г., Березан О.М.

#### РІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ МАНЕВРНОСТІ ЗБІЛЬШЕННЯМ СТУПЕНІ РУХОМОСТІ МАШИН З НЕГОЛОНОМНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ КОЛІСНОГО ТИПУ

Аналізується принцип побудови рульової трапеції Жанто. Отримані докази, що цей принцип є перешкодою для значного підвищення маневреності і ступеней рухомості машин і автопоїздів. Пропонується методика підвищення маневреності засобами керування поворотом неголономної системи колісного типу.

Tolubko V.B., Vasil'ev B.G., Berezan A.M.

#### DECISION OF PROBLEM OF MANOEUVRABILITY BY AN INCREASE DEGREES OF MOBILE OF MACHINES WITH THE NON-HOLONOMIC COPULAS OF THE WHEELED TYPE

Principle of construction of steering trapezoid of Zhanto is analysed. Proofs are got, that this principle is hindering for the considerable increase of manoeuvrability and degrees mobile of machines and lorry convoys. The method of increase of manoeuvrability is offered by facilities of management of the non-holonomic system of the wheeled type a turn.